

на входе  $t_{в1}$ , значения которых приведены в табл. 4. Все уравнения адекватны по критерию Фишера. Все коэффициенты значимы по критерию Стьюдента. Погрешность расчета по уравнениям не превышает 1,5 % относительно исходных данных.

**Таблица 4.** Коэффициенты уравнения линии излома  $G_2$  от  $t_{в1}$

$W_{ос}, \text{м}^3/\text{ч}$	$a_0$	$a_1$	$a_2 \cdot 10^3$
8000	205,0	-1,702	-20,476
12000	203,3	-2,112	-8,095
16000	204,9	-2,429	0

Для расчета температурного напора по заданным  $W_{ос}$ ,  $G_2$  и  $t_{в1}$  необходимо по уравнению линии излома определить  $G_{2изл}$  по  $t_{в1}$ . Если  $G_2 < G_{2изл}$ , то  $\delta t$  определяем по уравнению расчета температурного напора в области до излома, иначе – после.

Если при расчете  $P_2$  или  $\delta t$  расход воды отличается от табличного, то расчет производим по двум ближайшим табличным расходам воды, а потом полученные  $P_2$  или  $\delta t$  интерполируем или экстра-

полируем по расходу воды.

### Выводы

1. Произведен комплексный анализ массива экспериментальных данных по энергетическим характеристикам оборудования тепловых электрических станций со сложной границей разделения на примере конденсатора КГ2-620-III турбоустановки Т-118/125-130-8 Томской ГРЭС-2.
2. Для аналитического описания массива экспериментальных данных применен метод регрессионного анализа и составлена система уравнений, позволяющая с достаточной степенью приближения описать давление и температурный напор конденсатора в зависимости от расхода пара и температуры охлаждающей воды на входе при постоянном расходе охлаждающей воды. С целью повышения точности уравнений массив данных для температурного напора разбит на смежные области со сложной границей разделения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – М.: Служба передового опыта ОРГЭС, 1995. – 124 с.
2. Драйпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
3. Клямкин С.Л. Тепловое испытание паротурбинных установок электростанций. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 408 с.
4. Гирифельд В.Я., Галашов Н.Н. Выбор существенных факторов при построении многофакторных моделей энергетических показателей по статистическим отчетным данным энергосистем и ТЭС // Труды МЭИ. – 1979. – Вып. 408. – С. 118–125.

Поступила 22.12.2008 г.

УДК 536.21

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПЕНОСТЕКЛЬНОЙ ШИХТЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Р.В. Городов

Томский политехнический университет  
E-mail: gorodov@tpu.ru

Описаны процедуры проведения эксперимента по определению зависимости теплопроводности шихты, используемой для производства пеностекла, от температуры за один опыт и обработки полученных результатов. Представлен фракционный состав пеностекляной шихты. Определена аппроксимирующая функция полученной зависимости.

### Ключевые слова:

Фракционный и химический составы, пеностекляная шихта, определение теплопроводности.

### Введение

Оптимальный температурный режим является одним из важнейших этапов в рациональной технологии производства пеностекла, т. к. в зависимости от выбранного режима можно получить пеностекло с широким диапазоном свойств.

Для научно-обоснованного объяснения свойств и структуры пеностекла на различных этапах его

возникновения необходимо достаточно полно знать механизм формирования исходной системы, из которой в результате постепенного накопления газообразных продуктов при нагревании формируется пеностекло. При разработке теоретической кривой вспенивания необходимо учитывать взаимосвязь между физическим состоянием смеси на каждом технологическом этапе и динамикой изменения ее теплофизических свойств [1].

Подогрев пенообразующей смеси в металлической форме до температуры спекания продолжается относительно длительное время. Но данные о времени нагрева шихты до температур спекания являются неоднозначными. В [2] проведен анализ пяти экспериментов, проведенных различными исследователями, и показано, что это время лежит в довольно широких пределах: от 15 до 70 мин., хотя условия экспериментов практически одинаковые.

Приведенные примеры достаточно наглядно иллюстрируют отсутствие единого мнения об оптимальном режиме нагрева пенообразующей смеси, предшествующего вспениванию. Исходя из этого, считаем целесообразным более детально изучить тепловые процессы на первой стадии формирования пеностекла – нагреве шихты, для чего в [3] была предложена математическая модель процесса нагрева с учетом реальной геометрии – металлической формы, в которой исходная шихта подается в печь.

Решение поставленной задачи не возможно без изучения теплофизических свойств пеностекольной шихты, т. к. в литературе [1, 2, 4-7] этот вопрос практически не освещен. В [2], например, представлена лишь зависимость коэффициента теплопроводности шихты от ее плотности при комнатной температуре. В [4] приведена упрощенная математическая модель процесса нагрева шихты и ее решение без каких-либо указаний на свойства шихты. В остальных источниках подробно рассмотрены свойства уже готового пеностекла. Исходя из этого, были проведены эксперименты по определению зависимости температуропроводности шихты, используемой для производства пеностекла на ОАО «Томская домостроительная компания», в зависимости от температуры.

#### Определение фракционного состава пеностекольной шихты

Теплофизические свойства сыпучих материалов очень сильно зависят от их фракционного состава – размера частиц [8, 9] и их химического состава. Химический состав стеклянного боя, используемого в качестве исходного материала для подготовки пеностекольной шихты на заводе ОАО «Томский домостроительный комбинат», приведен в табл. 1.

**Таблица 1.** Химический состав исходного стекла, мас. %

SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	BaO	K <sub>2</sub> O
71,9	3,5	5,5	15,1	1,5	0,1	–	1,6	0,8

Для определения фракционного состава шихты был использован полный ситовой анализ [10], табл. 2. Взвешивание полученных фракций проводилось на весах HL-100 с пределом допускаемой основной погрешности  $\pm 0,03$  г.

Из табл. 2 следует, что в исследуемой шихте содержатся преимущественно частицы с эквивалентным диаметром 67,93 мкм.

**Таблица 2.** Результаты опыта по определению дисперсного состава шихты

Номер сита	Масса остатка на сите, г	Размер ячейки, мкм	Доля от общей массы, %
8	1,61	750	0,123
10	2,20	600	0,169
12	2,22	500	0,169
16	3,39	375	0,261
24	8,20	250	0,631
30	4,39	200	0,338
40	6,29	150	0,484
50	13,39	120	1,030
70	52,88	86	4,068
80	225,23	75	17,325
100	571,32	60	43,948
110	406,98	55	31,306
130	0,60	46	0,046
Собирающий поддон	1,30	–	0,100
Итого	1300,00	–	100,000

#### Определение зависимости температуропроводности шихты от температуры за один опыт

Теоретические основы метода

Определение зависимости температуропроводности шихты от температуры проводилось по методу, предложенному О.А. Краевым [11, 12]. Суть метода заключается в том, что, осуществляя в опыте нагрев или охлаждение образца в необходимом интервале температур и измеряя при этом температуру в двух точках образца, удастся найти температурную зависимость коэффициента температуропроводности. Особенностью метода является то, что процесс нагрева (охлаждения) образца может протекать при любых начальных и граничных условиях; необходимо только, чтобы температура образца менялась со временем монотонно.

В работах [11, 12] рассматривается бесконечно длинный цилиндр, внутри которого имеется нестационарное поле температуры. Предполагается, что оно имеет осевую симметрию, т. е. зависит только от радиуса  $r$  и времени  $\tau$ . Это поле описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\rho \cdot c(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda(t) \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda(t)}{\partial r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность сыпучего вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda(t)$  – теплопроводность сыпучего вещества, Вт/(м·°C);  $c(t)$  – удельная теплоемкость сыпучего вещества, Дж/(кг·°C).

Начальное и граничные условия:

$$\tau = 0: \quad t = t_{нач};$$

$$r = r_0: \quad t = t_0(\tau);$$

$$r = r_R: \quad t = t_R(\tau).$$

Температурное поле  $t(r, \tau)$  представляется в виде следующего степенного ряда:

$$t(r, \tau) = A_0(\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n}(\tau) \cdot r^{2n}. \quad (2)$$

При подстановке этого ряда в уравнение (1) оно должно обращаться в тождество для любого  $r$  в интервале  $0 \leq r \leq R$ , где  $R$  – радиус цилиндра. Положив  $r=0$ , получают выражение

$$A_2 = \frac{1}{4a} \cdot \frac{dA_0}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $a = \lambda(t)/(c(t) \cdot \rho)$  – температуропроводность исследуемого вещества,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Для определения остальных коэффициентов ряда (2) берут вторую, четвертую и так далее, производные по радиусу от ур. (1), а затем в результаты дифференцирования подставляют ряд (2) и, положив  $r=0$ , находят выражения, из которых определяют следующие коэффициенты ряда:

$$\begin{aligned} A_4 &= \frac{1}{16a} \cdot \frac{dA_2}{d\tau} + \frac{1}{4c(t)} \cdot \frac{dc(t)}{dt} A_2 - \frac{1}{4\lambda(t)} \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} A_2^2; \\ A_6 &= \frac{1}{36a} \cdot \frac{dA_2}{d\tau} + \frac{16}{27} \cdot \frac{dc(t)}{dt} A_2^2 - \\ &\quad - \frac{1}{\lambda(t)} \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} A_2 A_4 + \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2c(t)}{dt^2} A_2^2 - \\ &\quad - \frac{1}{8\lambda} \cdot \frac{d^2\lambda(t)}{dt^2} A_2^3 - \frac{4}{27} \left( \frac{1}{c(t)} \cdot \frac{dc(t)}{dt} \right)^2 A_2^3 + \\ &\quad + \frac{4}{27} \left( \frac{1}{c(t)} \cdot \frac{dc(t)}{dt} \right) \cdot \left( \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt} \right) A_2^3 \end{aligned} \quad (4)$$

и т. д.

В полученных выражениях  $\lambda(t)$ ,  $c(t)$ ,  $a(t)$  и их производные взяты при температуре  $t_0$  центра образца в момент времени  $\tau$ . Температуры в центре образца и в точке  $r=R$  соответственно равны:

$$t_0 = A_0; \quad (5)$$

$$t_R = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \cdot R^{2n}. \quad (6)$$

Разность температур между точкой  $R$  и центром:

$$\Delta t_R = t_R - t_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \cdot R^{2n}. \quad (7)$$

Подставляя вместо коэффициентов ряда (7) их выражения (3), (4) и преобразовывая полученное выражение, получают:

$$\begin{aligned} a &= \frac{R^2}{4\Delta t_R} \cdot \frac{d}{d\tau} \left( t_0 + \frac{1}{4} \Delta t_R \right) - \frac{5}{2304} \frac{R^4}{a\Delta t_R} \frac{d^2\Delta t_R}{d\tau^2} + \\ &\quad + \frac{1}{18432} \frac{R^6}{a^2\Delta t_R} \frac{d^3\Delta t_R}{d\tau^3} - \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Следовательно, измеряя в опыте  $t_0$  и  $\Delta t_R$  в зависимости от времени и используя соотношение (8), можно определить зависимость коэффициента температуропроводности от температуры. Во второй и последующие члены ряда (8) входит искомая величина  $a$ . Ввиду малости этих членов для них рекомендуется брать приближенное значение  $a$ , равное первому слагаемому [11, 12]. По результатам прове-

денных опытов максимальное расхождение между значениями температуропроводности, вычисленными по формуле (8) с учетом одного и двух членов ряда, составило  $0,015 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Это подтверждает малость второго и последующих членов ряда по сравнению с первым и позволяет при обработке экспериментальных данных использовать без большой ошибки только первое слагаемое формулы (8).

Расчетная формула (8) получена для бесконечно длинного цилиндра. Для цилиндрического образца конечной длины вследствие торцевых эффектов возможна ошибка, которая определяется из выражения:

$$\frac{\Delta a}{a} \approx \frac{1}{2} \frac{R^2}{L^2} \frac{\Delta t_L}{\Delta t_R}, \quad (9)$$

где  $R$ ,  $L$  – радиус и высота цилиндра соответственно;  $\Delta t_L$  – разность температур между точками  $z=0$  и  $z=L$  на образующей цилиндра.

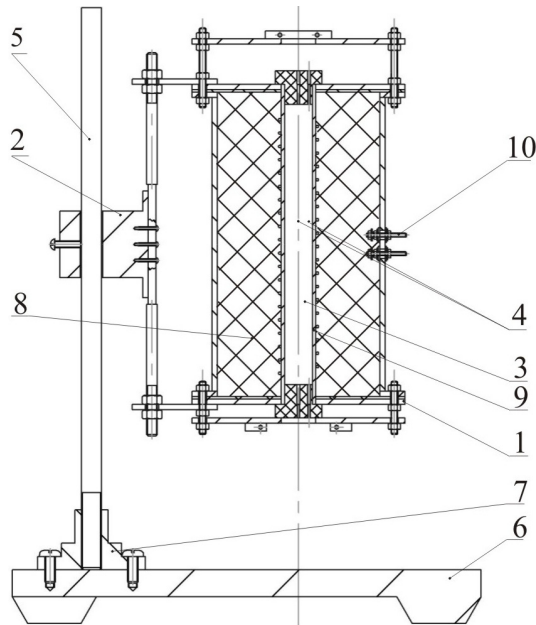
Для уменьшения этой ошибки был выбран достаточно длинный образец –  $R/L=9/240$ , а торцы печи были хорошо заизолированы для снижения перепада температур по длине цилиндра. Из формулы (9) видно, что наибольшее значение ошибки будет достигаться в том случае, когда отношение  $\Delta t_L/\Delta t_R$  максимально. В серии проведенных опытов это условие выполнялось при температурах близких к  $600^\circ\text{C}$ , т. к. при этом  $\Delta t_L$  и  $\Delta t_R$  становятся сравнимыми по величине, а их отношение достигает максимального значения:  $\Delta t_L/\Delta t_R=6,10/11,25=0,54$ . Следовательно, относительная погрешность за счет торцевых эффектов в этом случае составит

$$\frac{\Delta a}{a} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{R^2}{L^2} \cdot \frac{\Delta t_L}{\Delta t_R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{9^2}{240^2} \cdot 0,54 \cdot 100\% = 0,04\%.$$

Исходя из полученного результата, можно сделать вывод о том, что в условиях проведенного эксперимента образец можно считать бесконечно длинным и, соответственно, определять зависимость температуропроводности от температуры по формуле (8) с учетом только первого слагаемого.

Особенности установки и проведения эксперимента

Установка, схема которой приведена на рис. 1, представляет собой печь сопротивления. Внутри имеется керамическая трубка – 9, в которую помещается исследуемый образец – 3 (сыпучее вещество). Трубка, на которую намотан нагреватель – нихромовая проволока, помещена в металлический цилиндрический корпус – 1, заполненный асбестовым волокном (изоляция) – 8. Печь сопротивления крепится на платформе – 6. Нагрев осуществляется электрическим током, который подводится к нагревателю при помощи токовыводов. Температура в центре  $r=0$  и на радиусе  $r=9 \text{ мм}$  образца измеряется при помощи отградуированных хромель-алюмелевых термопар – 4. Большинство конструктивных элементов камеры (корпус, фланцы и т. д.) изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.



**Рис. 1.** Схема установки для определения зависимости температуропроводности от температуры: 1) печь; 2) крепежный механизм; 3) исследуемое вещество; 4) термопары; 5) шток; 6) платформа; 7) крепление; 8) асбест; 9) керамическая трубка; 10) токовводы

Печью сопротивления образец нагревался до заданной температуры ( $\approx 600^\circ\text{C}$ ). Термопара, расположенная в центре образца, присоединена к прибору автоматического следящего уравнивания КСП4, т. к. в формуле для определения температуропроводности (8) необходимо подставлять абсолютное значение температуры в центре. Термопара, расположенная на радиусе  $r=9$  мм образца, дифференциально соединяется с термопарой в центре и подключается к цифровому вольтметру типа Щ1526И, что позволяет измерять термоЭДС, по значению которой определяется разность температур  $\Delta t_R$  [13]. Для нахождения зависимости температуропроводности от температуры была проведена серия из пяти опытов, в которых одновременно измерялись  $t_0$  и  $\Delta t_R$ . Эти измерения производились в определенные моменты времени, которые отмечались через каждые 72 с.

#### Обработка результатов эксперимента

Достаточно часто при исследовании динамических характеристик промышленных объектов измеряется не выходная координата  $y(t)$ , а сумма ее с некоторой случайной функцией (помехой)  $n(t)$  [14]. Таким образом, экспериментатор при снятии переходных функций регистрирует случайную функцию  $z(t)$ :

$$z(t) = y(t) + n(t).$$

Случайный стационарный процесс  $n(t)$  генерируется непосредственно в самом исследуемом объекте, либо представляет собой случайную наводку в цепях измерения, либо привносится в объект некоторыми входными параметрами. Как правило,  $n(t)$  имеет нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием.

Определение по ней коэффициентов дифференциального уравнения возможно лишь после соответствующей обработки, заключающейся в выделении из экспериментальной функции  $z(t)$  истинной  $y(t)$ . Сглаживание данных эксперимента является специальной операцией усреднения с помощью интерполяционных полиномов, обеспечивающих получение уточненного значения  $\tilde{y}$  по ее заданному значению и ряду близлежащих значений ( $\dots y_{i-2}, y_{i-1}, y_i, y_{i+1}, y_{i+2} \dots$ ), известных со случайной погрешностью.

Таким образом, все полученные экспериментальные данные, необходимые для определения зависимости температуропроводности от температуры, входящие в формулу (8) были сглажены. Для этого применялся метод линейного сглаживания по пяти точкам с использованием формул [14]:

$$\tilde{y}_0 = (3y_0 + 2y_1 + y_2 - y_3) / 5;$$

$$\tilde{y}_1 = (4y_0 + 3y_1 + 2y_2 + y_3) / 10;$$

$$\tilde{y}_i = (y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}) / 5;$$

$$\tilde{y}_{N-1} = (4y_N + 3y_{N-1} + 2y_{N-2} + y_{N-3}) / 10;$$

$$\tilde{y}_N = (3y_N + 2y_{N-1} + y_{N-2} - y_{N-3}) / 5.$$

Дифференцирование полученных функций выполнялось по формулам [15]:

$$y'(x) \approx \frac{y_{i+2} - y_{i+1} - y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{x_{i+2} - x_{i+1} - x_{i+1} - x_i}{x_{i+2} - x_i} \cdot (2x - x_i - x_{i+1});$$

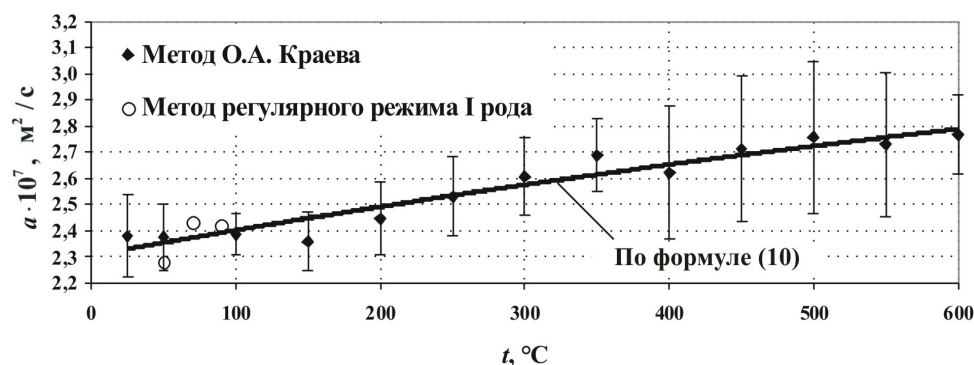
$$y''(x) \approx 2 \cdot \frac{y_{i+2} - y_{i+1} - y_{i+1} - y_i}{x_{i+2} - x_i} \cdot \frac{x_{i+2} - x_{i+1} - x_{i+1} - x_i}{x_{i+2} - x_i} \cdot (2x - x_i - x_{i+1}).$$

После проведения сглаживания и численного дифференцирования, полученных экспериментальных функций по формуле (8) определялась зависимость температуропроводности от температуры для каждого из 5 проведенных опытов. Полученная зависимость температуропроводности от температуры, а также аппроксимирующая кривая представлена на рис. 2.

Максимальное среднеквадратическое отклонение результатов измерений составило  $0,29 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Погрешность измерений при доверительной вероятности  $p=0,95$  не превышает  $0,81 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

#### Проверка полученных результатов

Для проверки корректности полученных результатов и правильности работы экспериментальной установки по определению теплофизических характеристик материалов обычно используют эталонные образцы, характеристики которых известны. Сравнивая полученные экспериментальные данные с эталонными значениями, можно сделать вывод об адекватности эксперимента. Однако данные по теплофизическим характеристикам сыпучих материалов не однозначны. Например, в [16] приведена зависимость температуропроводности песка от температуры. В то же время использовать эти дан-



**Рис. 2.** Результаты экспериментов по определению зависимости температуропроводности шихты от температуры разными методами

ные в качестве эталонных было бы не корректно, т. к. в источнике не указан ни дисперсный, ни химический составы этого песка. Поэтому для проверки и подтверждения результатов эксперимента был проведен опыт по определению температуропроводности шихты другим методом — методом регулярного режима I рода [17]. В качестве термостатирующей жидкости была использована дистиллированная вода, что позволило определить температурную зависимость температуропроводности шихты в интервале температур 50...100 °С.

На рис. 2 сопоставлены результаты определения зависимости температуропроводности от температуры двумя рассмотренными методами. Из сравнения этих результатов видно, что они достаточно хорошо согласуются между собой и аппроксимируются выражением

$$a(t) = (-3,10 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 9,92 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,305) \cdot 10^{-7}.$$

Коэффициент детерминации полученной аппроксимации  $R^2 = 0,924$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. — Минск: Наука и техника, 1972. — 304 с.
2. Демидович Б.К. Пеностекло. — Минск: Наука и техника, 1975. — 247 с.
3. Городов Р.В., Кузьмин А.В. Математическая модель процесса нагрева шихты при производстве пеностекла // Современные техника и технологии: Труды XIV Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. — г. Томск, 2008. — Т. 3. — С. 356–359.
4. Китайгородский И.И., Кешишян Т.Н. Пеностекло. — М.: Промстройиздат, 1953. — 78 с.
5. Шилл Ф. Пеностекло (производство и применение). Перев. с чеш. — М.: Стройиздат, 1965. — 307 с.
6. Китайцев В.А. Технология теплоизоляционных материалов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1970. — 384 с.
7. Горяинов К.Э., Дубенецкий К.Н., Васильков С.Г., Попов Л.Н. Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1976. — 536 с.
8. Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. — 80 с.
9. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. Измерение массы, объема и плотности. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 623 с.
10. ГОСТ 5954.2-91. Ситовый анализ класса крупности менее 20 мм.
11. Краев О.А. Метод определения зависимости температуропроводности от температуры за один опыт // Теплоэнергетика. — 1956. — № 4. — С. 15–18.
12. Краев О.А. Простой метод измерения теплопроводности теплоизоляторов // Теплоэнергетика. — 1958. — № 4. — С. 81–82.
13. ГОСТ Р 8.585-2001 Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
14. Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 220 с.
15. Численные методы / Под ред. У.Г. Пирумова. — М.: Дрофа, 2007. — 144 с.
16. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. Окислы. — Л.: Энергия, 1973. — 333 с.
17. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1979. — 320 с.

Поступила 26.01.2009 г.